

燃气轮机涡轮叶片 U 型通道的流动特性优化

耿峰, 张杨

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要:在燃气轮机中,叶片内部的高效冷却通道是保障发动机安全稳定运作的关键技术。着重对内冷通道流动特性进行优化研究,使用二维仿真进行优选,并通过大涡模拟验证了通道的性能优化。结果表明,非对称的回转段与隔板凸起结构显著削弱了二次流的强度,并使下游的流动更加均匀,优化结构的阻力系数下降了 38.76%。

关键词:燃气轮机;涡轮叶片;U 型通道;数值计算;流动性能

中图分类号:V231; TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)03-0037-04

Optimization of U-shaped Channel in Gas Turbine Blade on Flow Characteristics

GENG Feng, ZHANG Yang

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In gas turbines, efficient cooling channels inside the blades is the key technology to ensure the safety and stability of the engine. Focused on the optimization study of the flow characteristics of the internal cooling channel, two-dimensional simulation was adopted and the optimized performance of the channel was verified by large eddy simulation. The results show that the asymmetric turning section and the raised structure of the divided plate significantly weaken the strength of the secondary flow, the downstream flow became more uniform and the pressure loss of the optimized structure decreases by 38.76%.

Keywords: gas turbine; turbine blade; U-shaped channel; numerical simulation; flow characteristics

0 引言

随着先进燃气轮机的涡轮进口温度不断提高,涡轮叶片材料的耐温极限已无法满足性能需求,因此通过先进的冷却技术来保障涡轮叶片安全稳定地运行尤为关键。在众多的涡轮叶片冷却技术中,内冷通道不仅是一种十分重要的叶片内部冷却技术,还是气膜冷却等叶片外部冷却的冷气来源。流动与换热是评价涡轮叶片内冷通道性能的两个主要参数。为了降低叶片温度并确保冷却系统安全稳定地运转,内冷通道不仅需要优异的换热强度,通道的流动性能也不容忽视。

WANG T 等^[1]采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型对光滑 U 型通道进行了仿真研究,分析了通道内造成局部损失的二次流结构。此外,一些学者对 U 型通道的几何形状进行优化。KIYIC Firat^[2]、TOM Verstraete^[3]、龚建英^[4]、宋乙丹等^[5]学者将优化算法与数值仿真相结合,对 U 型通道进行优化设计。KERISHNENDU Saha^[6]为了获得更好的流动换热特性的蜿蜒通道,详细研究了几种特殊回转区形状的通道,优化后的通道流动性能提升了约 30%。而在仿真方法的选择方面,颜培刚^[7]对比了 RANS 与 LES 对内冷通道仿真结果,发现 LES 更加准确地预测到了平均速度分布和脉动量湍动能的分布规律。

基于前人的研究,本文针对 U 型通道内的二次流结

构,以降低通道流动损失为目的,设计了一系列 U 型通道,并用大涡模拟对优选通道进行验证。

1 数值解决方案

1.1 几何模型

图 1 为基础通道的二维物理模型与三维物理模型。在减阻通道的设计过程中,为了削弱通道回转段两个角涡以及第二通道低速回流区造成的局部损失,设计了以下几类通道。

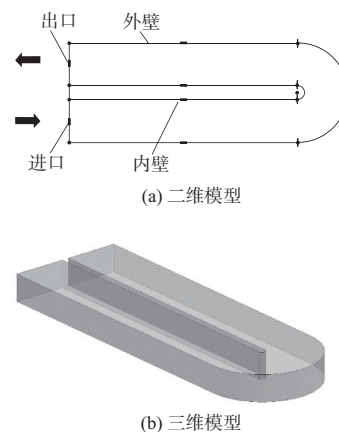


图 1 几何模型及其边界示意图

基金项目:省部级基金项目(KF7)

第一作者简介:耿峰(1995—),男,安徽芜湖人,硕士研究生,研究方向为涡轮叶片内冷通道。

图 2 为各类通道以及特征尺寸的示意图,表 1 为基础通道几何尺寸。基础模型回转段的内、外壁面均为半圆且与直段平滑连接。顶端偏移结构(Case2 系列)的回转段外壁面切点偏离基础模型对称轴, P 为切点与第一通道外壁面的距离。非对称倒角结构(Case3 系列)回转段入口侧倒角为 $R1$,出口侧倒角为 $R2$ 。异形隔板结构(Case4 系列)对隔板形状进行改进,改进的几何尺寸包括回转区中段与第二通道中段之间的隔板几何形状, $P1$ 、 $P2$ 分别代表隔板凸状物的切点与基础模型回转壁面圆心的 y 向与 x 向距离。

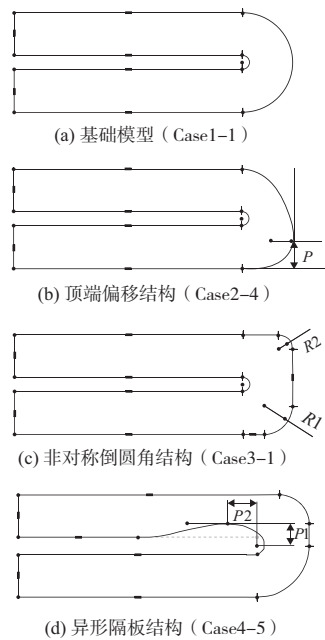


图 2 二维减阻结构示意图

表 1 基础通道几何尺寸 单位:mm

结构参数	尺寸
当量直径(三维) D	20
通道直段长度 L	160
通道截面宽 W	30
通道截面高 H	15
隔板厚度 B	10

三维计算时,内冷通道的截面宽高比 Aspect Ratio (以下简称 AR)对通道流动影响巨大,根据文献[8-10]的结论:随着 AR 增大,可以提高综合热性能。考虑涡轮叶片内冷通道的常用尺寸范围,最终确定 $AR=2:1$,其余尺寸和二维通道一致。表 2 为各类通道的特征几何尺寸。

1.2 边界条件与工况

在二维数值仿真中,入口处采用速度入口边界条件,出口设置为压力出口。对所有二维通道在雷诺数 $Re=30\ 000$ 下的流动性能进行对比。此外,将各系列通道中最优结构(表 2 标 * 的通道)的工况扩展为 $Re=10\ 000\sim 60\ 000$ 。表 3 为二维计算的边界条件。

表 2 特征几何尺寸

编号	结构名称	几何尺寸/mm
1	Case1-1 * *	Base(基础模型)
2	Case2-1	$P=5$
3	Case2-2	$P=10$
4	Case2-3	$P=15$
5	Case2-4	$P=20$
6	Case2-5	$P=25$
7	Case2-6	$P=30$
8	Case2-7	$P=40$
9	Case2-8 *	$P=45$
10	Case2-9	$P=50$
11	Case2-10	$P=55$
12	Case2-11	$P=60$
13	Case2-12	$P=65$
14	Case3-1	$R1=20,R2=10$
15	Case3-2	$R1=30,R2=15$
16	Case3-3 *	$R1=35,R2=20$
17	Case4-1	$P1=10,P2=15$
18	Case4-2	$P1=10,P2=20$
19	Case4-3	$P1=10,P2=25$
20	Case4-4	$P1=15,P2=15$
21	Case4-5 * *	$P1=15,P2=20$
22	Case4-6	$P1=15,P2=25$

表 3 二维通道边界条件

边界类型	具体参数及说明
速度入口	速度/(m/s):7.55、15.10、22.65、30.20、37.76、45.31
压力出口	出口压力/Pa;0
壁面	无滑移壁面

在本文设计的工况范围内,通道内整体的流速较低,故选择不可压气体作为工质(密度 1.225 kg/m^3 ,黏性系数 $1.85\times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$),数值求解方法选用 SIMPLE 算法。采用大涡模拟对基础模型与优选通道(表 2 标 * *)进行仿真,令入口雷诺数 $Re=30\ 000$,时间步长 Δt 设置为 $5\times 10^{-6}\text{ s}$,残差控制在 10×10^{-4} 以内。在经过 2~3 个流动周期后,槽道内流体充分发展,开始统计平均,再经过 5~7 个时间步后获得仿真结果。

1.3 湍流模型与网格划分

在二维仿真中,使用了文献[1]在 U 型通道的研究过程中采用的可实现 $k-\varepsilon$ 湍流模型。此外,建立了与 COLETTI F^[11] 实验中完全相同的物理模型,并将不同湍流模型得出的仿真结果与文中实验结果进行对比,最终确定采用 Kinetic-Energy Transport 模型进行仿真计算。在经过网格独立性验证后,得出表 4 的网格划分参数。

表 4 网格划分的主要参数

参数名	大小
边界层第一层网格高度/mm	0.025
边界层网格增长比率	1.1
网格质量	>0.7
网格数	约 15×10 ⁵

1.4 数据处理

水力直径的定义如式(1)所示。

$$D=\frac{4A}{C} \quad (1)$$

其中: D 为水力直径,m; A 为通道横截面面积,m²; C 为通道横截面周长,m。

雷诺数 Re 表征流体惯性力与黏性力之比,定义式如下:

$$Re=\frac{\rho u D}{\mu} \quad (2)$$

其中: ρ 为流体密度,kg/m³; u 为流体速度,m/s; μ 为流体黏性系数,Pas。

为了分析通道的沿程阻力损失,将通道下壁面分为 18 个小区,如图 3 所示。当地阻力系数 f_i 代表每个区域的无量纲压力损失,通道的整体阻力系数 f_i 定义如式(4)所示。

$$f_i=2(p_{n,out}-p_{n,in})/(\rho \bar{u}_{in}^2) \quad (3)$$

$$f_i=\frac{p_{in}-p_{out}}{4\left(\frac{L^*}{d}\right)(0.5\rho \bar{u}_{in}^2)} \quad (4)$$

式中: $P_{n,out}$ 为区域 n 的出口压力; $p_{n,in}$ 区域 n 的通道入口压力; p_{out} 为通道出口压力; p_{in} 为通道入口压力; ρ 、 u_{in} 均为通道入口处的状态参数; L^* 为两点间流向长度。

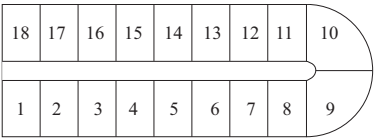


图 3 通道下壁面分段示意图

2 结论与讨论

2.1 二维方案设计

图 4 展示了 $Re=30\,000$ 时二维通道的整体阻力系数,Case2 系列中减阻性能最佳的通道为 Case2-8,阻力系数为 1.426;Case3 系列中减阻性能最佳的通道为 Case3-3,阻力系数为 1.386 ;Case4 系列中减阻性能最佳的通道为 Case4-5,阻力系数为 0.54。

Case1-1 与 Case2-8、Case3-3、Case4-5 通道的沿程阻力系数如图 5 所示。结果显示各通道在进入回转段后沿程阻力系数会显著升高,随后在第二通道入口处降为负数,经过低速回流区后压力逐渐回升,最终趋于稳定。对

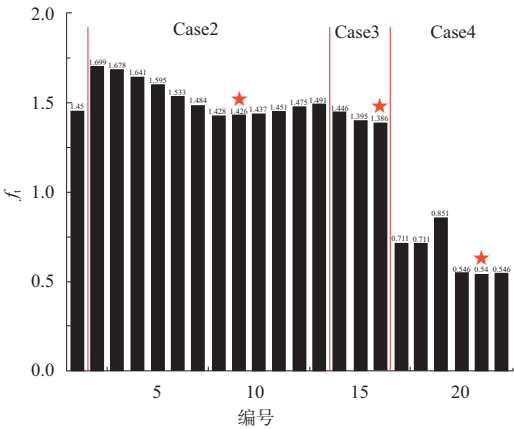


图 4 不同二维结构的整体阻力系数

比 Case1-1、Case2-8、Case3-3 通道,Case2-8 在回转区后半段(区域 10 处)的沿程阻力系数最低,而 Case3-3 整体的流动性能更为优异。Case4 系列通道在 Case3-3 通道的基础上对隔板顶端形状进行优化,可以看出 Case4-5 能有效抑制在低速回流区的影响范围,结果显示其不仅显著改善第二通道的沿程阻力系数,还极大地降低了流体在回转段的压力损失。

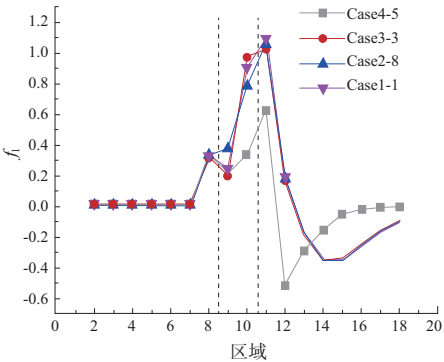


图 5 典型通道的沿程阻力系数 ($Re=30\,000$)

图 6 展示了二维通道整体阻力系数随雷诺数的变化。可以看出,随 Re 数的增长,整体阻力系数逐步下降,并且流动性能均有 Case4-5> Case3-3 >Case2-8> Case1-1,而 Case4-5 通道的阻力系数相较于其余结构具有显著的优势,以 Case1-1 为基准可以带来 75%~85% 流动性能改善,说明相较于回转段角涡带来的局部损失,第二通道低速回流区会产生更大的损失。

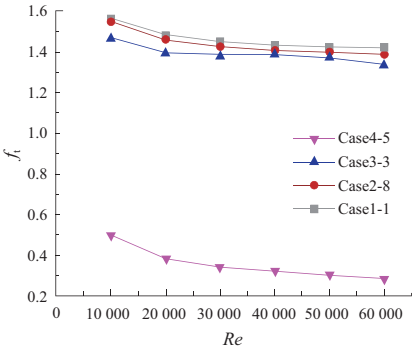


图 6 不同雷诺数下通道整体阻力系数

2.2 LES 结果分析

为了获得更加真实的流动细节,本小节对 Case1-1、Case4-5 的 LES 结果进行了分析。图 7 为通道对称面的流线图,Case1-1 通道隔板后并未形成一个完整的回流区,取而代之的是一个包含数个涡核的低速区;而 Case4-5 通道在分离板顶端形成了小型涡流(图 7(b) 圆圈所示)。

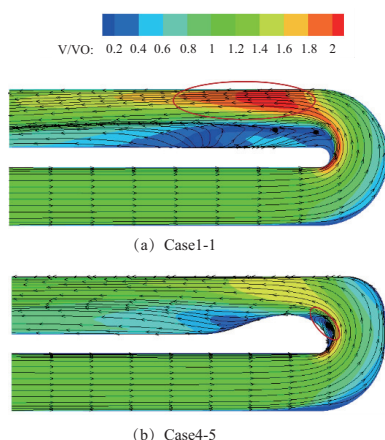


图 7 通道对称面的流线图($Re=30\ 000$)

三维大涡模拟的结果显示,由于三维效应的影响,流动性能的优化没有二维工况下的幅度大,但优选通道的整体阻力系数相较于基础模型依旧下降了 38.76%。如图 8 所示,三维仿真结果与二维仿真结果呈现出相同的趋势,并且碰撞区(图 7(a) 圆圈所示)与低速回流区的强度以及影响范围均大幅下降,使 Case4-5 通道在回转段后的流动损失远小于 Case1-1 通道,而在第二通道后半段 Case4-5 的压力回升也要快于 Case1-1,下游的流动更加均匀。

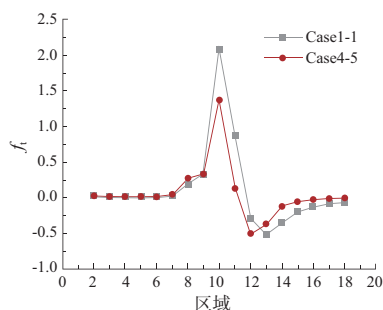


图 8 通道的沿程阻力系数分布

3 结语

本文对燃气轮机涡轮叶片内冷通道的流动性能进行了研究,针对主要的局部损失进行优化设计,获得减阻性能优异的内冷通道并对其进行了验证,主要结论如下:

1) Case4-5 通道的异形分离板结构显著削弱了通道内的二次流强度,此外还对第二通道的流动起到了整流作用,有效地控制了流体在第二通道处碰撞损失,相较于基础模型,通道阻力系数下降了 38.76%。

2) Case3-3 非对称的回转段相较于半圆形回转段(Case1-1)可有效减小流体冲击顶端壁面所带来的碰撞损失,在雷诺数 $Re=10\ 000\sim 60\ 000$ 的范围内,二维工况下通道阻力系数下降了 5%~10%。

3) 二维仿真与三维仿真对 U 型通道流动特性的预测具有相同的趋势,故通过二维计算对减阻通道进行方案优选的可靠性较好。

参考文献:

- [1] WANG T, CHYU M K. Heat convection in a 180-deg turning duct with different turn configurations [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1994, 8(3): 595-601.
- [2] KIYICI Firat. U-turn optimization of a ribbed turbine blade cooling channel using a meshless optimization technique [C]// 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Grapevine, Texas, Reston, Virginia: AIAA, 2017.
- [3] TOM Verstraete, LI Jing. Multi-objective optimization of a U-bend for minimal pressure loss and maximal heat transfer performance in internal cooling channels [C]. Proceedings of ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition, San Antonio, Texas, USA: June 3-7, 2013.
- [4] 龚建英, 高铁瑜, 吴伟烽, 等. 燃机叶片 U 带肋冷却通道的结构优化[J]. 压缩机技术, 2019(3): 11-16.
- [5] 宋乙丹. 涡轮叶片内冷通道的流动传热特性分析及优化设计[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
- [6] KRISHNENDU Sada, SUMMANTA Acharya. Effect of bend geometry on heat transfer and pressure drop in a two-pass coolant square channel for a turbine [J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(2): 021035.
- [7] 颜培刚, 杜明杰. 燃气涡轮带肋冷却通道流动与换热的大涡模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(1): 75-81.
- [8] HAN J C. Heat transfer and friction characteristics in rectangular channels with rib turbulators [J]. Journal of Heat Transfer, 1988, 110(2): 321-328.
- [9] JENKINS S C, SHEVCHUK I V, VON WOLFERSDORF J, et al. Transient thermal field measurements in a high aspect ratio channel related to transient thermochromic liquid crystal experiments [J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 134(3): 031002.
- [10] CHANG S W, LIOU T M, JUAN W C. Influence of channel height on heat transfer augmentation in rectangular channels with two opposite rib-roughened walls [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(13): 2806-2813.
- [11] COLETTI F, VERSTRAETE T. Optimization of a U-bend for minimal pressure loss in internal cooling channels—part I [J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 135(5): 1665-1667.

收稿日期: 2020-04-03